

題名 自動車用懸架ばね用鋼の高強度化に関する研究

Title Study on further strengthening of suspension spring steel for automobiles

所属 自然科学研究科機械科学専攻次世代鉄鋼総合科学講座

氏名 久保田, 学

Abstract

The reduction of weight of suspension springs substantially contributes to the improvement of fuel efficiency of automobiles. In order to reduce the weight of them, the increase of the fatigue strength of steels is essential to improve the designed stress of suspension springs. Since the fatigue strength of suspension springs is deteriorated by the corrosion, so-called corrosion fatigue is one of the inhibiting factors to further increase the strength of suspension springs.

First, the dominant factors of corrosion fatigue property of suspension spring steel such as corrosion pits, prior-austenite grain size, hydrogen embrittlement and residual stress caused by shot peening were extracted and the effects of these factors were evaluated. It was revealed that the relationship between corrosion pit depth and compressive residual stress depth is the first dominant factor determining the corrosion fatigue property of suspension spring steels.

Secondly, for the purpose of improving the hydrogen embrittlement property as the second dominant factor of corrosion fatigue property, “high temperature ausforming process” was focused on. A large inhibiting effect of recrystallization is newly obtained by adding V to suspension spring steel with about 0.55 mass.%C.

From the result of present study, when accepting the formation of corrosion pit with considerable depth, it was considered that the high reliability for the fatigue strength of suspension springs is achieved by multi-step shot peening. Furthermore, the production of suspension springs which have superior resistance to hydrogen embrittlement is expected to become realized by combining the high temperature ausforming process with the multi-step shot peening process.

学位論文要旨

懸架ばねの軽量化は自動車の燃費の改善に大きく貢献する。懸架ばねの軽量化のためにばねの設計応力を向上するためには、鋼材の疲労強度を向上することが重要である。このため近年は、ロックウェル硬さ **HRC52~54** を超える強度レベルを有する高強度の懸架ばねが求められている。自動車の足廻りの使用環境では、跳ね石やばねの線間接触などによって懸架ばねの塗装が損傷し、そこから侵入する水分や融雪剤に起因する塩分の影響によって鋼材が腐食し、疲労強度が低下する、いわゆる腐食疲労が問題となる場合があり、懸架ばねの高強度化の主な阻害因子の一つとなっている。本研究は、自動車用懸架ばね用鋼の腐食疲労特性の支配因子を解明し、それに基づいて懸架ばね用鋼の高強度化の指針を提示することを目的として行われたものである。以下に研究成果の概要を示す。

最初に、腐食疲労特性の支配因子として、腐食ピット、旧オーステナイト (γ) 粒径、水素およびショットピーニングによる圧縮残留応力を抽出し、各因子の影響を分離して評価した。その結果、腐食ピットがない場合、あるいは腐食ピットの深さが圧縮残留応力分布に対して浅い場合には水素による疲労強度の低下が腐食疲労特性の支配因子であること、これに対して、腐食ピットの深さが圧縮残留応力に対して深い場合には人工腐食ピットの深さと圧縮残留応力分布の関係が腐食疲労特性の支配因子であることを明らかにした。また、水素による疲労強度の低下量よりも人工腐食ピットによる疲労強度の低下量の方が大きいことを明らかにすることによって、人工腐食ピットの深さと圧縮残留応力の関係が腐食疲労特性の第 1 の支配因子であることを明らかにした。

次に、腐食疲労特性の第 2 の支配因子である水素脆化特性を改善する技術として、高温オースフォーム技術を取り上げた。懸架ばね用鋼の工業生産に高温オースフォームプロセスを適用するため、加工硬化 γ を得るための再結晶抑制技術について検討を行った。その結果、懸架ばね用鋼は V 添加によって大きな再結晶抑制効果を示す新知見を得た。また、懸架ばねの疲労強度を確保する上で重要な制約条件である脱炭の抑制との両立を図る上で、V 添加による再結晶の抑制が実用上最も効果的であることを示した。さらに、マルテンサイトの結晶方位から母相 γ の結晶方位を再構築する方法を応用することによって、オースフォームドマルテンサイト組織の EBSD 測定データから計算によって加工硬化 γ 組織を再現した。これにより、従来解析が難しかった、熱間加工時の γ 組織の結晶方位解析が可能であることを示し、オースフォームドマルテンサイト組織の新たな解析手法を提案した。また、V 添加による大きな再結晶抑制効果のメカニズムを検討するため、透過型電子顕微鏡及び 3 次元アトムプローブによる析出物の観察を行った。その結果、再結晶抑制のメカニズムとして、C-V 複合体による回復・再結晶の抑制の可能性が考えられると推察した。

本研究の成果から、ショットピーニングの多段化によって、ある程度の大きさの腐食ピットの生成を許容しながら、懸架ばねの疲労強度に対する信頼性を確保することができることが明らかになった。さらに高温オースフォーム処理を組み合わせれば、水素脆化特性にも優れた懸架ばねを製造することが可能となるため、腐食疲労特性に優れた高強度懸架

ばねを得ることができる。また本研究は、熱間加工 γ の回復・再結晶に及ぼす各種因子の影響について系統的に検討したものであり、今後の応用範囲も広いと考えられる。したがって、懸架ばね用鋼への適用のみならず、鉄鋼材料の加工熱処理一般にかかわる知見として広く有用である。

本論文は9章から構成されており、その要旨は以下のとおりである。

第1章では、まず自動車用の懸架ばねの製造工程と代表鋼種について述べた。さらに懸架ばね用鋼の高強度化の重要性と高強度化の阻害因子について、腐食ピットおよび水素脆化の影響に関するこれまでの知見と、克服技術としてのショットピーニングと高温オースフォームに関するこれまでの知見と課題について整理した。その上で本研究の目的、本論文の構成について記述した。

第2章では、本研究の第一の目的を検討するため、懸架ばね用鋼の腐食試験を行うことによって腐食によって生成する腐食ピット深さと、腐食によって鋼中に吸蔵される拡散性水素量の評価を行った。この結果を踏まえて人工腐食ピットの形状を検討し、モデル実験を行うことによってショットピーニング材の疲労特性に及ぼす腐食ピット深さと残留応力分布の関係と旧 γ 粒径の影響について検討を加えた。

第3章では、第2章に引き続いて懸架ばね用鋼の腐食疲労特性に及ぼす水素の影響について検討した。すなわち、疲労特性に及ぼす人工腐食ピット深さ、水素チャージ量、残留応力分布、旧 γ 粒径の影響について総合的に検討を加えることによって腐食疲労特性の支配因子を明らかにした。また、試験片を実際に腐食させた後に疲労試験を行うことによってモデル実験の妥当性を検証した。

第4章では、本研究の第二の目的を検討するため、第2章、第3章で提示された腐食疲労特性の向上の指針である、圧縮残留応力の改善による腐食疲労特性の改善の可能性を検証するため、腐食疲労特性に及ぼす多段ショットピーニングの影響を評価した。また、破面観察を詳細に行うことによって、水素チャージ材に介在物を起点とするフィッシュ・アイ疲労破壊が起こる原因を考察した。

第5章では、第2章～4章において残された課題である水素脆化特性の改善を図る技術として、高温オースフォーム技術を取り上げた。高温オースフォームを工業生産に適用するための成分・プロセス条件を検討するために、熱間加工 γ の回復・再結晶挙動を評価するための、二段加工法の試験条件について検討した。

第 6 章では、本研究の第三の目的を検討するため、第 5 章で確立した試験条件を用いて加工 γ の静的軟化挙動に及ぼす Al, Nb, V, Ti, B 添加の影響と、加熱温度、および加工・保持温度の影響を系統的に検討することによって懸架ばねの高温オースフォームに適した成分、プロセス条件を明らかにした。また、懸架ばね用鋼は V 添加によって大きな再結晶抑制効果を示すことを新たに明らかにした。さらに、Nb, V, Ti 添加による再結晶抑制効果に及ぼす炭素量の影響を検討することによって合金元素の添加による再結晶抑制メカニズムについて検討を加えた。

第 7 章では、マルテンサイトからの母相 γ 方位再構築法を応用することによって、計算によりオースフォームドマルテンサイトから加工硬化 γ 組織を再現し、各種の結晶方位解析を行った。これにより、第 5 章で測定した加工 γ の静的軟化挙動と実際の回復・再結晶挙動をある程度関連付けて解析できることを明らかにした。これにより、従来解析が難しかった熱間加工時の γ 組織の結晶方位解析が、マルテンサイトからの母相 γ 方位再構築法によって十分可能となることを示した。

第 8 章では、第 6 章で新たに知見した、懸架ばね用鋼の V 添加による大きな加工 γ の再結晶抑制効果のメカニズムを検討するため、TEM および 3DAP による観察を行った。また、再結晶の抑制に必要な析出物の分布を試算し、観察結果と比較した。これらの結果から V 添加による再結晶の抑制メカニズムを考察した。

第 9 章では、結言として本研究で得られた知見を総括し、今後の工業的応用について述べた。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

自動車用懸架ばね用鋼の高強度化に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 機械科学 専攻

(2) 氏 名 ^{ふり} ^{がな} ^く ^ぼ ^た ^{まなぶ}
久保田 学

3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に関し、平成27年1月30日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に審査した。同日に口頭発表の後、第2回学位論文審査委員会を開催し、慎重に協議の結果、以下の通り合格と判定した。

本論文は、自動車用懸架ばね用鋼の高強度化の指針を提示することを目的に取り組まれたものである。すなわち、懸架ばねの腐食疲労特性の支配因子の明確化とそれに基づくショットピーニングによる腐食疲労特性の改善技術、ならびに耐水素脆化特性を向上するオースフォーミングを工業生産に適用するための基本条件の構築、に関する研究を行い指導原理を提案した点に価値がある。具体的には、腐食疲労強度は腐食ピット底に作用する圧縮残留応力によって整理できると、腐食ピットの深さが圧縮残留応力より浅い場合には水素による疲労強度の低下が腐食疲労の支配因子であること、一方腐食ピットの深さが圧縮の残留応力より深い場合には水素の有無にかかわらず疲労強度が低下することを明らかにした。また、高強度化と耐水素脆化特性の両立を狙ったオースフォーミングの実現に挑戦し、加熱時の脱炭を防止するという制約条件のもとVの添加によりオーステナイトの再結晶が著しく抑制され両特性の両立が可能である知見を得た。

以上のように、本論文は自動車用懸架ばね用鋼の更なる高強度化が期待できる貴重な知見を示すものであり、学術的にも工業的にも価値が高く、博士（工学）の学位に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判 定（いずれかに○印） 合 格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士（工学）